

である。このダイオードの構造および発光原理図を図2.1に示す。すべてのLEDは図に示す構造から研究が開始され、高輝度化のために構造的な改良が加えられ、可能なものに対してはヘテロ接合構造が導入された。

一般にヘテロ接合構造が形成できる条件は、図2.2のように、禁制帯幅（もしくは混晶比）が変化しても化合物半導体と格子定数がほとんど変わらない混晶が存在することである。すなわち、発光層の化合物半導体と格子整合する混晶が実現できることが必要である。しかしながら、GaP LED の場合にはGaPよりも禁制帯幅が大きくかつ格子定数が一致する混晶が存在しないので、現在でもホモ接合型が主流にならざるを得ない。3 原色の1つである緑色LEDの明るさが赤色LEDほど飛躍的に向上できない理由は、GaP 結晶が間接遷移型であることと良好なヘテロ接合を形成することができないことにある。

また、例えばn形GaAsP結晶領域中にp形不純物を拡散あるいはイオン注入することにより形成された拡散型p-n接合もホモ接合型の一つである。

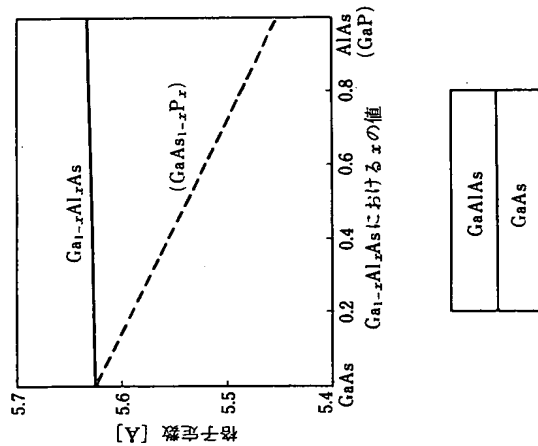


図 2.2 GaAlAsの組成と格子定数の関係

2.2 ヘテロ接合 (Hetero-junction)

異なる結晶を接合して形成されたp-n接合をヘテロ接合という。発光層の片側のみにヘテロ接合が形成されたものをシングルヘテロ (Single Hetero; SH) 接合という。発光層 (活性層) を禁制帯幅の大きなp形とn形のクラッド層でサンドイッチした構造を有する接合がダブルヘテロ (Double Hetero; DH) 接合である (図2.3)。図からわかるように、n形クラッド層から活性層に注入された電子は、p形クラッド層との境にできているポテンシャル障壁によって拡散を阻止され活性層内に閉じ込められる。この障壁の高さは、活性層とクラッド層のバンドギャップ差 ΔE_g に相当し、通常0.3eV程度必要である。同様に活

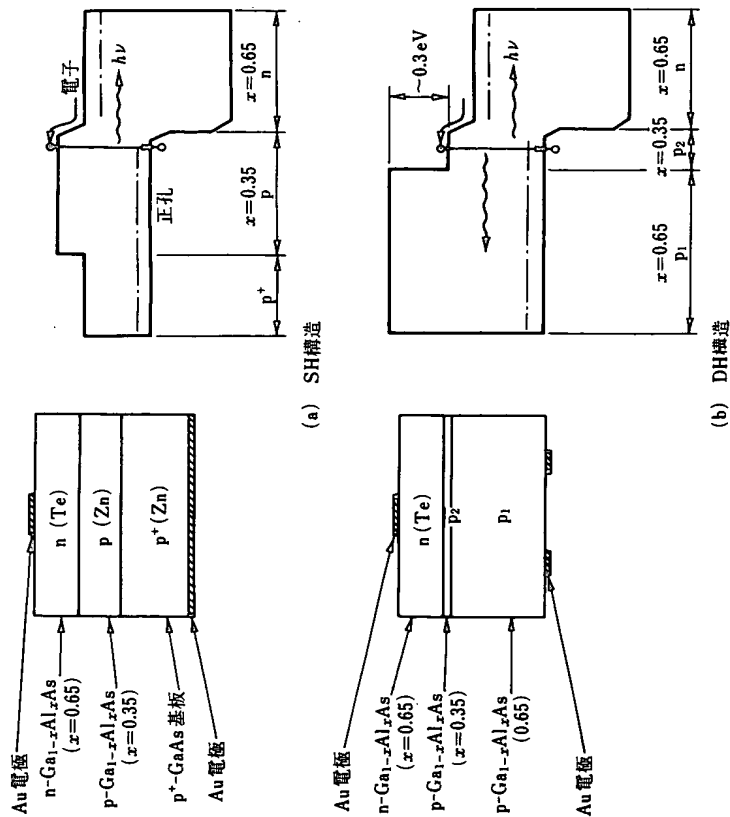


図 2.3 LEDチップ断面構造とエネルギーバンド構造

性層に注入された正孔は、p 形クラッド層と活性層との境に形成された ΔE_g へ $\sim 0.3\text{eV}$ 相当のポテンシャル障壁により拡散が阻止される。通常 LED からの発光強度は、電子と正孔の密度が高いほど強く生じるので、注入キャリアがクラッド層に溢れ出ない範囲 ($d \sim 1\mu\text{m}$) においては、活性層で生じる内部発光出力 P_i は活性層厚 d が小さいほど大きくなる。一般に内部発光出力 P_i は、

$$P_i = \eta_i \frac{h\nu}{qJ}$$

$$= \frac{h\nu}{q} B n_i J \left(p_0 + n_0 + \tau_n \frac{J}{qd} \right)$$

と表すことができる。ここで、 η_i は内部量子効率、 $h\nu$ はフォトンエネルギー、 q は電子の電荷、 B は再結合定数、 p_0 と n_0 は活性層に存在する正孔と電子の密度、 τ_n は注入キャリアのライフタイム、 J は電流密度である。ここで、 $\tau_n \cdot J/qd$ は注入キャリア密度を表す。

すなわち、上記のことから、ヘテロ接合構造においては、

- ① 活性層とクラッド層の間に約 0.3eV のポテンシャルエネルギー ΔE_g が必要である。
- ② 両層の格子定数がほぼ一致していることが必要である。

ヘテロ接合間の格子整合が取れていない場合には、境界面にミスフィット転位が形成され、これが非発光遷移に関与して τ_n が小さくなり、 P_i を低下させてしまう。

この2条件が有効なヘテロ接合ダイオードを形成するための必要十分条件である。これを満足するヘテロ接合を形成できる組合せとしては、

- ① GaAs-GaIn-AlAs
- ② InP-InGaAs-P
- ③ GaSb-GaIn-AlAs-Sb

の3種類がある。この組合せにおいては混晶組成の x, y を最適に調整することにより、成長層と基板との格子整合が取れ、かつ有効なエネルギー障壁をつくることができる。

しかし、適当な基板結晶が存在しない場合には、基板の格子定数を徐々に変換させ、発光層の格子定数に合わせるための格子定数勾配層を形成し、欠陥が

直接遷移型の組成領域の場合 間接遷移型の組成領域の場合

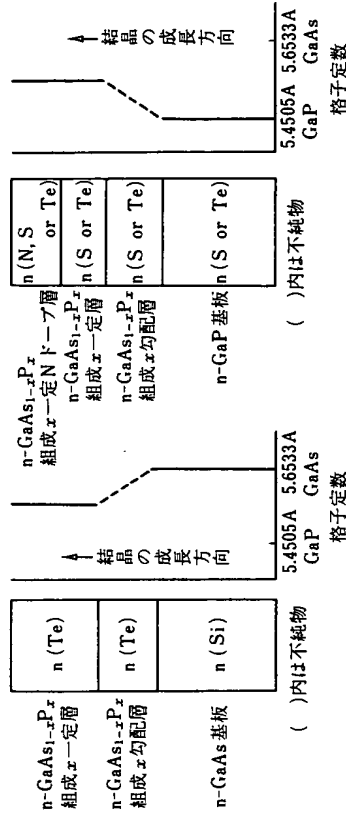


図 2.4 GaAsP LED のエピタキシャル構造

含まれているが実用化されたヘテロ接合型 LED もある。この例としては、GaAs 基板上に気相成長法により n 形 GaAs_{1-x}P_x 層をエピタキシャル成長し、Zn を拡散して p-n 接合を形成した赤色 LED が最初である (図 2.4)。この組合せでは、両層の格子定数差により成長層中に独特のクロスハッチパターンといわれる格子状の欠陥列を多数含有している。この欠陥の存在により、高輝度化が阻害されていた。次に登場した GaAs 上の GaAlAs は、上記した 3 つのヘテロ接合のうち 1 つで、GaAs と AlAs の格子定数がほとんど同じで禁制帯幅が異なる関係性を有している。すなわち、GaAs 基板上に格子不整を生じることなく良好な結晶性を有する混晶の Ga_{1-x}Al_xAs 成長層が得られ、かつ禁制帯幅異なる接合 (バンドの壁) の形成を可能にした。これが理想に近いヘテロ接合で、p-n 接合の p 形側、n 形側のいずれか片側に形成された構造をシングルヘテロ (SH) 接合、両側に形成された構造をダブルヘテロ (DH) 接合と称する (図 2.3)。

この構造の出現は、その後のオプトエレクトロニクスの大発展をもたらす要因となった。660nm に発光ピークを有する DH 接合型 GaAlAs 赤色 LED の出現で、LED が屋外でも利用することのできる光源として認識された。また、DH 接合構造の概念は半導体レーザへも導入され、室温連続発振を実現し、光通信分野、レーザディスプレイなどの新分野を出現させた。

開発経緯に沿って、図 2.3, 2.4 に示す各構造の GaAlAs 赤色 LED について

おくの
奥野 保男

1973年東北大学工学研究科博士課程修了、工学博士、同年
(財)半導体研究振興会入所、1987年スタンレー電気(株)技術
研究所入所、1990年から(財)神奈川科学技術アカデミー第4
研究室長を兼務、主として、化合物半導体および発光ダイオ
ードに関する研究に従事。
1995年よりアメリカ在住。

発光ダイオード

平成5年1月20日 初 版
平成15年9月5日 第2刷

著 者 奥野保男

発行者 飯塚尚彦

発行所 産業図書株式会社

〒102-0072 東京都千代田区飯田橋2-11-3

電話 03(3261)7821(代)

FAX 03(3239)2178

<http://www.san-to.co.jp>

© Yasuo Okuno 1993

中央印刷・清水製本

ISBN 4-7828-5708-X C 3355